

四轴联动数控螺旋锥齿轮铣齿机的齿长曲率修正*

张 华 曹雪梅 邓效忠 魏冰阳

(河南科技大学机电工程学院, 洛阳 471003)

【摘要】 常规机床对螺旋锥齿轮的齿长曲率进行修正时,需从机床上拆装铣刀盘,并重新调整其行程直径,过程繁琐。对此利用国产四轴数控铣齿机,建立铣齿加工坐标系,以及径向刀位、切削滚比变化多项式。用轮齿接触分析(TCA)的方法,以被加工齿面的接触路径、传动误差作为评价目标,研究径向刀位、切削滚比的变化对齿长曲率修正的规律。TCA分析及铣齿实验结果表明,不改变铣刀盘直径,即可实现对齿长曲率的修正,同时可更加灵活地控制齿面接触路径与传动误差。

关键词: 螺旋锥齿轮铣齿机 加工坐标系 轮齿接触分析 曲率修正

中图分类号: TH132.422 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)07-0205-05

4-axis CNC Spiral Bevel Gear Machine Tooth-profile Lengthwise Curvature Modification

Zhang Hua Cao Xuemei Deng Xiaozhong Wei Bingyang

(School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract

For traditional machine, to modify spiral bevel gear tooth-profile lengthwise curvature, cutter must be disassembled and adjusted its diameter. This is a complicated process. On domestic-made 4-axis CNC spiral bevel gear machine, machining coordinates were set up, cradle radial setting and roll ratio polynomials were proposed. With tooth contact analysis (TCA) technology, considering contact lines and transmission errors, the polynomials were taken into TCA process to study lengthwise curvature correcting rules. TCA and milling experiment showed that lengthwise curvature modification could be achieved without changing cutter diameter, contact lines and transmission error could be controlled more easily.

Key words Spiral bevel gear machine, Machining coordinates, Tooth contact analysis, Curvature modification

引言

螺旋锥齿轮数控加工机床拥有较大的加工调整自由度,为螺旋锥齿轮的设计、制造提供了更广阔的发展空间,自该类机床问世以来,针对该类机床的螺旋锥齿轮制造技术吸引了众多的学者进行研究^[1-4]。

螺旋锥齿轮的加工过程中,采用初始调整计算得到的机床调整数据,很少会一次性使接触区到

位^[5-6],接触区修正是螺旋锥齿轮加工过程中及其重要的一环,关系到切齿的效率和质量。螺旋锥齿轮数控铣齿机均采用两轴联动模拟传统机床摇台的运动,在齿面展成过程中刀位可以实时变化,可实现刀盘中心在“摇台”平面上的非圆弧运动,也可实现展成轮与工件间的非线性展成运动,使得对齿面接触区的控制更加灵活,为采用全新的模式加工螺旋锥齿轮提供了可能。Wang^[7]介绍了一种称之为MRM的加工方法用于模拟常规的SGM加工组合,

收稿日期:2009-03-07 修回日期:2009-05-08

* 国家自然科学基金资助项目(50675061)和河南科技大学博士科研启动基金资助项目

作者简介:张华,副教授,主要从事齿轮的数字化设计与制造技术研究, E-mail: lyzh7103@163.com

通讯作者:魏冰阳,教授,主要从事齿轮的数字化设计与制造技术研究, E-mail: bywei1966@163.com

以五轴联动数控铣齿机建立数学模型,通过径向刀位、角向刀位、切削滚比的变化修正齿面,即可达到SGM的加工效果,用数值仿真的方式进行了验证,但没有进行铣齿试验。为了调整两配对齿面的局部接触比例,需要对齿长曲率进行修正,传统的机械式机床在对齿长曲率进行修正时,需要重新拆装铣刀盘以调整铣刀盘的行程直径,过程繁琐。本文主要讨论在国产四轴联动数控铣齿机上,不改变刀盘直径,通过径向刀位、滚比修正,对齿长曲率进行修正的方法,并进行了铣齿试验。

1 数控螺旋锥齿轮铣齿机简介

Gleason公司的Free-form型机床可以实现五轴联动加工各种Gleason制螺旋锥齿轮,有3个平动轴(X 、 Y 、 Z)和2个旋转轴(A 、 B)。图1为其概念模型。

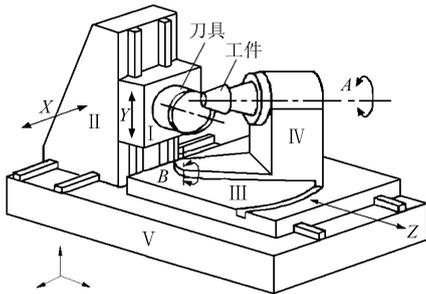


图1 数控螺旋锥齿轮铣齿机的概念模型

Fig. 1 Concept model of CNC spiral bevel gear machine

国产四轴数控螺旋锥齿轮铣齿机,外观与Free-form型机床相似,但它只具有4个数控轴,无旋转轴 B 。四轴数控铣齿机不能全部执行Free-form型机床所能完成的运动,即不能实现“刀倾法”加工准双曲面齿轮,及相应的齿面展成运动中的根锥角修正。但是,该机床可通过“变性法”加工准双曲面齿轮^[8-9]。

2 齿长曲率修正

为了便于描述,四轴数控铣齿机的加工调整参数引用摇台型机床的概念。在数控铣齿机上,这些加工调整项通过数控程序驱动数控轴进行调整,在摇台型机床上是手动调整。

常规摇台型机床的调整项一经调整,在齿面展成过程中是不能改变的。四轴数控铣齿机的相应调整项是通过数控轴的坐标位置设定实现的,因此在齿面展成时,切削刀盘与工件的相对位置关系可不断修改。除机床安装角外,径向刀位、角向刀位、垂直轮位、水平轮位、床位、切削滚比均可以在铣齿过程中单独改变或几个调整项同时改变。

常规的径向刀位改变只能改变齿形的螺旋角,在数控铣齿机上,不但可以很容易地实现常规方法对螺旋角的修正,还可以进行齿长方向的曲率修正。图2为齿面展成时的刀盘与工件相对位置示意图。齿面上的 M 点为对刀位置(切齿计算点),此时刀盘中心位于 O_1 点,对应的径向刀位为 $S_R^{(0)}$,角向刀位为 $q^{(0)}$,刀盘半径为 r_d 。数控铣齿机模拟摇台型机床运动时,刀盘中心在 XOY 平面内的运动轨迹为圆弧 AO_1B 。在齿面展成的任一时刻,刀盘中心位置沿摇台中心与刀盘中心的连线方向改变 ΔS_R ,工件的安装位置与运动规律不变。于是,产形轮与工件齿面的啮合位置发生了改变,工件齿面得以修正。

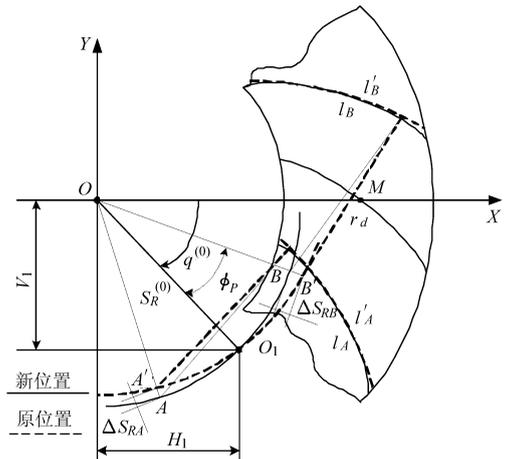


图2 径向刀位改变对齿长曲率的修正

Fig. 2 Tooth-profile lengthwise curvature modification with radial setting changing

根据径向刀位变化对螺旋角的影响规律,修正后的轨迹为圆弧 $A'O_1B'$, O_1 点的位置不变。修正后的齿线变为 l'_A 、 l'_B 。由图中可以看出,此时沿齿长方向的齿面曲率变大了。同样的方法,可以减小沿齿长方向的齿面曲率。

设刀盘中心在其运动轨迹上的某一位置,相对于原轨迹的径向刀位 $S_R^{(0)}$ 的改变量为 ΔS_R 。将 ΔS_R 表示为摇台转角 ϕ_p (单位为弧度)的函数,表达式为二次多项式

$$\Delta S_R = a\phi_p^2 + b\phi_p \quad (1)$$

其中, a 、 b 是二次多项式的常数项系数。在图2的 A 、 B 两点处,预置径向刀位的变化量 ΔS_{RA} 和 ΔS_{RB} ,代入方程,解得常数项系数,进而确定方程。

利用

$$S_R = S_R^{(0)} + \Delta S_R \quad (2)$$

则修正后的水平刀位 H_1 与垂直刀位 V_1 为

$$\begin{cases} H_1 = S_R \cos(q^{(0)} + \phi_p) \\ V_1 = S_R \sin(q^{(0)} + \phi_p) \end{cases} \quad (3)$$

需要指出的是,刀位的变化对齿轮副传动误差

和齿面接触区的影响很大,可能需要进一步的调整齿面二阶接触控制参数,使得传动误差和接触区满足要求。利用数控铣齿机的运动特性,可对切削滚比 $i^{(0)}$ 加以修正进一步控制传动误差与齿面接触区。

设滚比的改变量为

$$\Delta i = c\phi_p^2 + d\phi_p \quad (4)$$

切削滚比关系式修正后

$$i = i^{(0)} + \Delta i \quad (5)$$

将式(3)、(5)代入轮齿接触分析(TCA分析)的过程中,即可分析齿长曲率修正后的轮齿啮合情况。根据分析的结果,可不断调整 ΔS_{RA} 、 ΔS_{RB} 、 Δi ,直到分析的结果符合要求。

3 EPG 模型的构建与 TCA 分析

TCA 分析实质是构建一个虚拟的齿轮啮合检验机,用于模拟、检查齿轮副的啮合状况。如图 3 所示的坐标系 S_h 中,大轮、小轮安装在虚拟检验机上,并给定一定的安装位置:齿轮副偏置距 E 、小轮轴向安装距 P 、大轮轴向安装距 G 。该模型通常被称为 EPG 模型,小轮坐标系固连在坐标系 S_1 ,大轮坐标系固连在坐标系 S_2 ,两轮啮合时的转角分别为 ϕ_1 和 ϕ_2 ,角速度分别为 ω_1 和 ω_2 。大轮、小轮的齿面位置矢量和单位法矢量分别在 S_1 和 S_2 中表示,然后同时表示在 S_h 中,两轮要正确啮合,必须具有相同的齿面位置矢量与单位法矢量,由此组成 TCA 基本方程组。

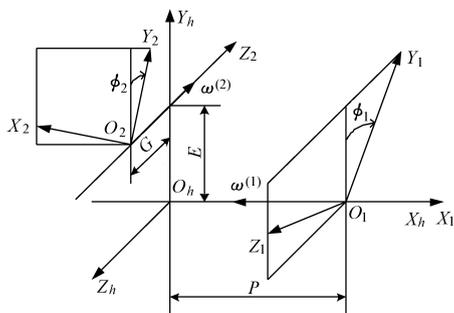


图 3 齿轮副啮合坐标系
Fig. 3 Gear mesh coordinates

齿面展成过程中,径向刀位、角向刀位、滚比实时变化对轮齿接触区的影响结果可以通过 TCA 分析进行模拟^[10],分以下几步完成:

(1)由大轮的刀具参数及基本加工参数,建立机床加工坐标系,求得大轮齿面的位置矢量 $r_2^{(2)}$ 和单位法矢量 $n_2^{(2)}$,并转换到固定坐标系 S_h 中,得

$$r_h^{(2)}(s_c, \theta_c, \phi_2) = M_{h2} M_{2c2} M_{c2c} r_c \quad (6)$$

$$n_h^{(2)}(\theta_c, \phi_2) = L_{h2} L_{2c2} L_{c2c} n_c \quad (7)$$

式中各参数及转换矩阵的意义在许多文献中均有描

述^[11],这里不再赘述。矩阵 L 是 M 的 3×3 阶转动部分。

(2)由小轮的刀具参数及调整加工参数,建立小轮加工坐标系,求得小轮齿面的位置矢量 $r_1^{(2)}$ 和单位法矢量 $n_1^{(2)}$,并转换到坐标系 S_h 中,得

$$r_h^{(1)}(\theta_p, \phi_p, \phi_1) = M_{h1} M_{1d} M_{dn} M_{nc1} M_{c1F} r_F \quad (8)$$

$$n_h^{(1)}(\theta_p, \phi_p, \phi_1) = L_{h1} L_{1d} L_{dn} L_{nc1} L_{c1F} n_F \quad (9)$$

式(5)改变了摇台转角与工件转角的函数关系。并且,工件转角 ϕ_1 满足

$$\phi_1 = i\phi_p \quad (10)$$

将式(3)、式(10)代入以上有关的坐标转换矩阵 M_{h1} 、 M_{1d} 、 M_{c1F} 。切齿时的小轮工件展角 ϕ_1 、水平轮位 H_1 、垂直轮位 V_1 成为摇台转角 ϕ_p 的函数。

(3)建立 TCA 基本方程为

$$r_h^{(1)}(\theta_p, \phi_p, \phi_1) = r_h^{(2)}(s_c, \theta_c, \phi_2) \quad (11)$$

$$n_h^{(1)}(\theta_p, \phi_p, \phi_1) = n_h^{(2)}(\theta_c, \phi_2) \quad (12)$$

(4)解由(11)、(12)两式组成的 TCA 方程组。根据齿面边界条件,得齿面接触路径和传动误差曲线^[9]。

根据分析结果不断调整相关系数,确定式(1)、式(4)。由以上修正过程可以看出,该方法充分发挥了数控铣齿机 X、Y、A 轴的运动特性,使得刀盘中心的运动轨迹不是单纯的绕坐标原点 O 的圆弧轨迹。齿面展成过程中,四轴数控铣齿机的 X、Y 数控轴以及工件轴 A 的运动不断得以修正。

4 齿长曲率修正举例与铣齿实验

以一对准双曲面齿轮的凹面为例,轮坯基本参数见表 1。基于数控铣齿机,不改变刀盘直径,以调整径向刀位为主,配合滚比的变化对齿长曲率进行修正。

表 1 准双曲面齿轮副的轮坯参数
Tab. 1 Hypoid gear blank parameters

| 参数 | 小轮 | 大轮 |
|-------------|-------|--------|
| 齿数 | 11 | 41 |
| 节圆直径/mm | | 374.62 |
| 小轮偏置/mm | 44.45 | |
| 小轮初始螺旋角/(°) | 50 | |
| 齿宽/mm | | 52 |
| 轴交角/(°) | | 90 |
| 平均压力角/(°) | | 22.5 |
| 轮齿收缩方式 | | 齿根倾斜 |

如图 2 所示,设当摇台转角 ϕ_p 为 0.174 532 9 (单位弧度,对应角度为 10°)时,对应图中 A 点; ϕ_p 为 -0.174 532 9 时,对应图中 B 点。设定 A、B 两点

的径向刀位改变量 $\Delta S_{RA} = 0.085$, $\Delta S_{RB} = -0.125$ 。

在不改变刀盘行程直径的前提下,原刀盘中心轨迹的 A 点,对应着切削小轮的小端,此时径向刀位增大,小端的螺旋角减小;在 B 点,对应着切削小轮的大端,此时径向刀位减小,大端的螺旋角增大。修正后,在齿长方向上的齿面曲率增大,而这种改变是在不改变刀盘行程直径的前提下完成的,这是常规摇台型机床不能做到的。

将 ΔS_{RA} 和 ΔS_{RB} 代入式(1),得 $a = -0.65658$, $b = 0.57297$ 。

将式(1)代入 TCA 分析的过程,由于刀位的变化,使得传动误差曲线严重不对称,说明单纯的变化

径向刀位不能保证 TCA 分析的结果达到满意的效果。进一步修正滚比关系式(4)。经多次尝试发现,式中的一次项系数 d 对于调整传动误差的对称性效果非常明显。改变后, $d = 0.012$, 相应得 TCA 分析后的传动误差曲线基本对称。

原设计结果为图 4a,新设计由于范成运动的变化,使得传动误差曲线的幅值变化很大,且接触路径的倾角有了改变。经多次尝试发现,式中的二次项系数 c 对于调整传动误差的幅值影响明显,改变后, $c = 0.008$ 。并考虑改变参考点处传动比的一阶导数值 m'_{21} 。两种设计的相关调整系数对比见表 2,调整后相应的 TCA 分析结果为图 4b。

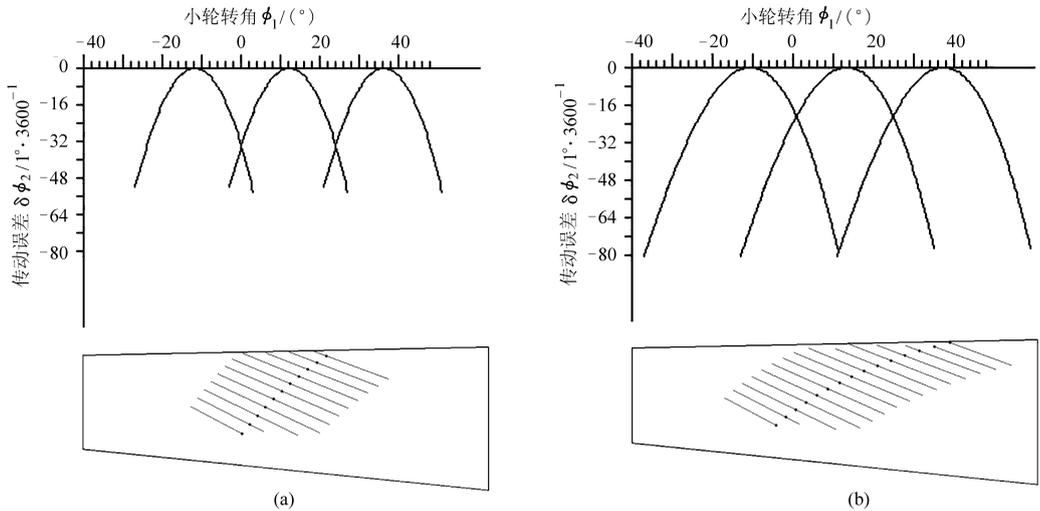


图 4 径向刀位、滚比改变前后的 TCA 分析结果对比

Fig. 4 TCA comparison of the radial setting and roll ratio change

(a) 修正前 (b) 修正后

表 2 小轮凹面 TCA 分析参数对比

Tab. 2 TCA parameters comparison of the hypoid pinion concave

| 项目 | m'_{21} | a | b | c | d |
|-----|-----------|--------|---------|-------|-------|
| 初始 | 0.003 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 修正后 | 0.002 | 0.4924 | -0.3151 | 0.008 | 0.012 |

对比图 4 中的两种 TCA 分析结果,图 4b 的接触区比图 4a 要长,这正是修正后齿长曲率变大的结果。若采用常规的方法,切齿刀盘直径不可避免地要发生变化。

实验在天津精诚 YH605 型四轴数控铣齿机上完成,采用 HFM 加工数据,目的是在不改变铣刀盘直径的前提下对齿长曲率进行修正。齿长曲率修正前齿面接触区照片见图 5a。不改变铣刀盘直径,根据式(2)、(5),修改铣齿数控加工程序对齿长曲率进行修正,由于小轮凹面的齿长曲率增大,滚动检查可见接触区明显变长,见图 5b。

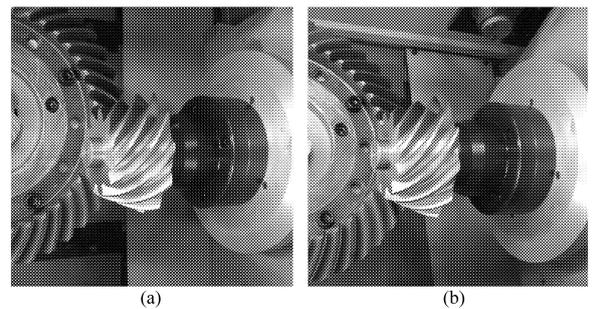


图 5 齿长曲率修正滚检

Fig. 5 Contact bearings lengthwise curvature modification

(a) 修正前 (b) 修正后

5 结论

(1) 提出了针对四轴数控螺旋锥齿轮铣齿机的齿长曲率修正方案,推导齿面位置矢量与单位法矢量,构建 EPG 模型,建立 TCA 方程组,通过在齿面展成过程中更改数控轴的运动对齿面进行修正,对修正过程及结果进行了 TCA 分析。

(2) 根据刀位对螺旋角的影响规律,不改变刀 削滚比对齿长曲率进行修正。
盘直径,数控铣齿机可通过实时地改变径向刀位、切

参 考 文 献

- 1 Litvin F L. Gear geometry and applied theory [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1994.
- 2 王小椿,吴联银,李彬,等. 基于空间运动学的传统机床与 Free-form 型机床运动转换方法的研究[J]. 机械工程学报, 2001,37(4):93~98.
Wang Xiaochun, Wu Lianyin, Li Bin, et al. Study on kinematic transformation from traditional machine tool to Free-form ones based on spatial kinematics [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(4):93~98. (in Chinese)
- 3 吴训成,毛世民,吴序堂. 点啮合齿面主动设计研究[J]. 机械工程学报,2000,36(4):70~73.
Wu Xuncheng, Mao Shimin, Wu Xutang. Study on the function-oriented design of point-contact tooth surfaces [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000,36(4):70~73. (in Chinese)
- 4 吴训成,陈志恒,胡宁. 曲线齿锥齿轮点啮合齿面主动控制加工技术[J]. 机械工程学报,2005,41(10):97~101.
Wu Xuncheng, Chen Zhiheng, Hu Ning. Active control manufacturing technology for the point-contact tooth surfaces of spiral bevel and hypoid gears [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005,41(10):97~101. (in Chinese)
- 5 李敬财,王太勇,范胜波,等. 基于数字化制造的螺旋锥齿轮齿面误差修正[J]. 农业机械学报,2008,39(5):174~177.
Li Jingcai, Wang Taiyong, Fan Shengbo, et al. Error corrections of spiral bevel gear tooth surface based on digitized manufacturing [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(5):174~177. (in Chinese)
- 6 王志永,于水琴,曾韬. 机床误差对螺旋锥齿轮齿形的影响规律[J]. 农业机械学报,2009,40(6):199~202.
Wang Zhiyong, Yu Shuiqin, Zeng Tao. Effect of machine tool errors on the tooth form of spiral bevel gears [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6):199~202. (in Chinese)
- 7 Wang Peiyu, Fong Zhanghua. Mathematical model of face-milling spiral bevel gears by modified radial motion (MRM) method [J]. Mathematical and Computer Modeling, 2005, 41(11~12): 1 307~1 323.
- 8 张华,邓效忠. 四轴数控螺旋锥齿轮铣齿机变性价铣齿研究[J]. 中国机械工程,2007,18(14):1 652~1 655.
Zhang Hua, Deng Xiaozhong. Modified-roll method study on 4-axis CNC spiral bevel gear machine [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(14):1 652~1 655. (in Chinese)
- 9 张华,邓效忠. 二轴数控螺旋锥齿轮铣齿机变性价铣齿研究[J]. 农业机械学报,2007,38(8):137~140.
Zhang Hua, Deng Xiaozhong. Modified-roll method study about 2-axis CNC spiral bevel gear machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(8):137~140. (in Chinese)
- 10 Litvin F L. Local synthesis and tooth contact analysis of face-milled spiral bevel gears, NASA CR 4342 [R]. Chicago: NASA Lewis Research Center, 1991.
- 11 方宗德,杨宏斌. 准双曲面齿轮传动的轮齿接触分析[J]. 汽车工程,1998,20(6): 350~355.
Fang Zongde, Yang Hongbin. Tooth contact analysis of hypoid gear drives [J]. Automotive Engineering, 1998, 20(6): 350~355. (in Chinese)

(上接第 197 页)

- 5 Bradshaw G, O'Sullivan C. Adaptive medial-axis approximation for sphere-tree construction [J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(1): 1~26.
- 6 Dorigo M, Gambardella L M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997, 1(1):53~66.
- 7 王义强,关雪松,陶俐言,等. 基于遗传算法的数字制造加工方案多目标优化[J]. 农业机械学报, 2008, 39(4):142~146.
Wang Yiqiang, Guan Xuesong, Tao Liyan, et al. Genetic algorithm-based multi-objective optimization for machining scheme selection [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(4):142~146. (in Chinese)
- 8 Xiao N, Bennett D A, Armstrong M P. Using evolutionary algorithms to generate alternatives for multi-objective site-search problems [J]. Environment and Planning, 2002, 34(1):639~656
- 9 张宝. 粒子群算法及其在卫星舱布局中的应用研究[D]. 大连:大连理工大学,2006.
Zhang Bao. Particle swarm optimization algorithm for satellite module layout optimization [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)